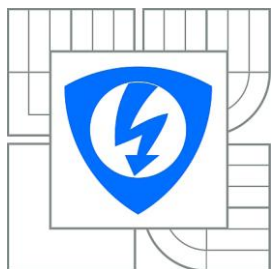


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DIELEKTRICKÁ REZONÁTOROVÁ ANTÉNA DIELECTRIC RESONATOR ANTENNA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

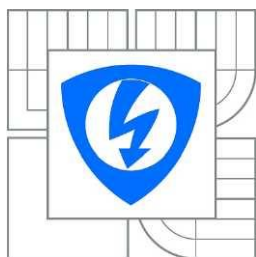
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL ŠTARHA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV LÁČÍK PhD.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Michal Štarha

ID: 98108

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Dielektrická rezonátorová anténa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem dielektrických rezonátorových antén a jejich základními typy. Svou pozornost zaměřte i na jejich možné způsoby napájení. Vše stručně popište.

Po dohodě s vedoucím práce jednu z těchto typů antén vyberte, navrhnete a modelujte v programu CST Microwave Studio s cílem dosažení požadovaných vlastností. Experimentálně ověřte obdržené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PROCHÁZKA, M. Antény - encyklopedická příručka, Praha: BEN - technická literatura, 2001.

[2] PETOSA, A., ITTIPOON, ANTAR, Y. M. M, ROSCOE, D. Recent advances in dielectric resonator antenna technology. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 1998, vol. 40, no. 3, pp. 35-48.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 28.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ: Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Michal Štarha
Bytem: Bílá Studně 14, 57101
Narozen/a (datum a místo): 23. Května ve Svitavách

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací
technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☒ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Dielektrická rezonátorová anténa

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jaroslav Láčik Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 28. května 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Tato práce pojednává o využití dielektrických rezonátorů jako antén. Jsou zde probrány možnosti napájení těchto antén, jako je napájení sondou, mikropáskovým vedením, štěrbínou, či koplanárním vedením. Poté je zde ukázka návrhu jednoduché pravoúhlé dielektrické rezonátorové antény a její simulace v programu CST Microwave Studio. Navržená anténa je vyrobena a změřena.

Klíčová slova

Dielektrický rezonátor, dielektrická rezonátorová anténa, CST Microwave Studio.

Abstract

This project deals with using of dielectric resonators as antennas. There are discussed possibilities feed of these antennas, as feed probe, feed of microstrip line, aperture coupling, or coplanar waveguide. Then there is a simple example design dielectric resonator antenna and its modeling in CST Microwave Studio. The designed antenna is fabricated and measured.

Keywords

Dielectric resonator, dielectric resonator antenna, CST Microwave Studio

Bibliografická citace

ŠTARHA, M. *Dielektrická rezonátorová anténa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 30s. Vedoucí semestrální práce Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Dielektrická rezonátorová anténa jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 28. května 2010

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Jaroslavu Láčíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 28. května 2010

.....
podpis autora

Seznam obrázků

Obr.2.1	Typické DRA napájené koaxiální sondou
Obr. 4.1.	Izolovaný pravoúhlý DR
Obr. 5.1a)	Napájení mikropáskovým vedením
Obr.5.1b)	Provedení napájení mikropáskovým vedením
Obr.5.2	Napájení invazivní sondou
Obr. 5.3	Napájení DRA obdélníkovou štěrbinou
Obr.5.4	Struktura napájení DRA koplanárním vlnovodem
Obr.7	Kvádrová DRA s napájením invazivní sondou
Obr.8.1	Model DRA
Obr.8.2	Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} DRA
Obr.8.3	Závislost reálné části vstupní impedance DRA na frekvenci
Obr. 8.4	Závislost imaginární části vstupní impedance na frekvenci.
Obr. 8.5	Vyzařovací diagramy DRA v rovině E a H při rezonanční frekvenci 2,5GHz.
Obr.9.1a)	S_{11} při různých tloušťkách lepidla.
Obr.9.1b)	Detail minima S_{11} při různých tloušťkách lepidla
Obr.9.2	Vlivy lepidel s různou permitivitou na S_{11} .
Obr. 10.1	Fotografie vyrobené antény.
Obr.10.2	Porovnání S_{11} simulované a vyrobené antény
Obr. 10.3	Porovnání změny fáze simulované a vyrobené antény
Obr. 10.4	Vyzařovací charakteristiky v rovině E a H simulované s reálnými rozměry.
Obr. 10.5	Vyzařovací charakteristika vyrobené DRA v rovině E
Obr. 10.5	Vyzařovací charakteristika vyrobené DRA v rovině H

Obsah

Seznam obrázků	5
Obsah	6
1 Úvod	7
2 Dielektrický rezonátor.....	7
3 Výhody a nevýhody DRA	8
4 Rozložení pole kvádrového DR	9
5 Napájení DRA	10
5.1 Napájení mikropáskovým vedením.....	10
5.2. Napájení koaxiální sondou	11
5.3 Napájení šterbinou.....	12
5.4 Napájení koplanárním vedením.....	13
6 Parametry antén.....	14
7 Návrh kvádrové DRA.....	15
8 Simulace kvádrové DRA v programu CST Microwave Studio	16
9 Simulace vlivů lepidla na DRA.....	19
9.1 Vliv tloušťky lepidla.....	19
9.2 Vliv permitivity lepidla	20
10 Výrba a měření DRA.....	20
10 Závěr	25
Literatura:	26
Seznam symbolů, veličin a zkratek	27

1 Úvod

V dnešní době využívají lidé spoustu služeb, jako jsou mobilní komunikace, sledování televize, či poslech rádia a mnoho dalších, které fungují pomocí bezdrátové komunikace. Tento počet služeb se neustále zvyšuje, a tím se postupně obsazují volná frekvenční pásma, a stále se postupuje k vyšším pracovním frekvencím. Také narůstá požadavek, aby zařízení pracovalo v širokém rozsahu frekvencí.

S rostoucí pracovní frekvencí se snižuje účinnost kovových antén, neboť v nich narůstají vodivostní ztráty. To vedlo ke zkoumání možnosti využít dielektrický rezonátor (DR) jako anténu, jenž bylo publikováno v roce 1983 [1]. Ztráty dielektrických rezonátorových antén (DRA) jsou způsobeny převážně ztrátami v dielektriku a jsou velmi malé.

Dielektrické antény lze napájet mnoha způsoby, jako jsou zavedené koaxiální sondy [2], mikropásková vedení [3], štěrbinou v zemní rovině substrátu s přívodním mikropáskovým vedením [4], či koplanárním vedením [5]. Vhodnou volbou rozměrů napájení a jeho umístěním lze dosáhnout vybudování požadovaného vidu v DR.

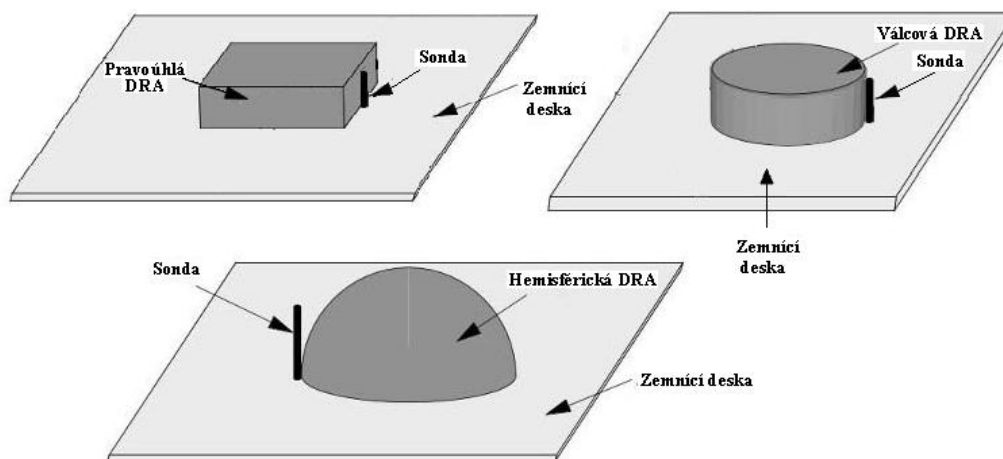
Cílem této práce je prozkoumat možnosti DR pro návrh antén a jeho možnosti napájení sondou, mikropáskovým vedením, či koplanárním vedením. Ukázat návrh DRA pracující na kmitočtu 2,5GHz. Tento návrh je posléze modelován a laděn v simulačním programu CST Microwave studio.

2 Dielektrický rezonátor

Anténní dielektrický rezonátor (DR) se vyrábí z nízkoztrátového dielektrika s relativní permitivitou řádově jednotek až desítek. Dielektrický rezonátor pracuje na principu objemové resonance, tudíž jeho rozměry určují jeho rezonanční frekvenci. V dielektriku je vybudována elektromagnetická vlna, ta se na rozhraní dielektrikum – vzduch odráží a láme. Při velkých hodnotách relativní permittivity ($\epsilon_r \approx 100$) je kritický úhel malý a elektromagnetické pole je uzavřeno uvnitř rezonátoru a za jeho hranice proniká jen velmi malé množství energie. [6]

Tvar a rozměry dielektrického rezonátoru jsou určující pro rezonanční frekvenci na daném vidu. Rezonátory mohou být kvádrové, válcové, nebo sférické. Dielektrické rezonátory jsou schopny pracovat v širokém pásmu frekvencí, toto pásmo je však omezeno rozměry DR. Pro materiály, které se používají pro výrobu dielektrických rezonátorů jsou důležité tyto parametry: relativní permitivita ϵ_r , malý ztrátový koeficient tg , jehož převrácená hodnota se blíží hodnotě koeficientu jakosti Q_0 a teplotní součinitel rezonančního kmitočtu.

Na obrázku 2.1 jsou znázorněny typické tvary dielektrických rezonátorových antén (DRA), jako jsou pravoúhlá (kvádrová) DRA, válcová DRA a hemisférická DRA. Antény jsou tvořeny dielektrickými rezonátory, které leží na vodivé zemní desce. Dielektrické rezonátory jsou napájeny přitíštěnou koaxiální sondou.



Obr.2.1 Typické DRA napájené koaxiální sondou.

3 Výhody a nevýhody dielektrických rezonátorových antén

- Malé rozměry a malá hmotnost
 - DRA mají obvykle vysokou vyzařovací účinnost ($> 95\%$) způsobenou absencí elektrického vodiče, nebo povrchových vln.
 - Použití různých tvarů dielektrických rezonátorů, jako jsou kvádr, válec, či sférický tvar dovolují přizpůsobivost návrhu.
 - Použitím různých napájecích mechanismů, jako jsou sonda, mikropáskové vedení, nebo buzení štěrbinou je dosaženo integrovat DRA s různými již existujícími technologiemi.
 - DRA jsou méně citlivé na toleranci chyb jak mikropáskové antény, speciálně při vysokých frekvencích.
 - DRA mohou pracovat v různých módech, pro různý rozsah požadavků mohou budít příčné vlny, nebo kruhově polarizované vlny.
 - Můžeme volit materiály v rozsahu permitivity od 6 do 100. To nám umožňuje kontrolovat při návrhu rozměry antény.
- Použití na nižších frekvencích se stává nevýhodné, neboť zde narůstají rozměry DRA. S narůstajícími rozměry narůstá zároveň jejich cena a váha.[7] Řešením je použití materiálu s vyšší permitivitou. Použití materiálu s vyšší permitivitou ale výrazně zmenší šířku pásma.

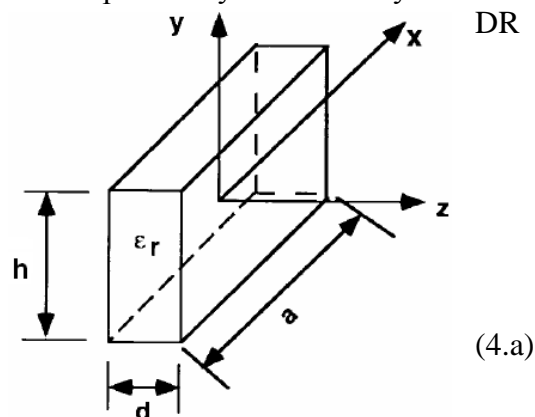
4 Rozložení pole kvádrového dielektrického rezonátoru

Na obr. 4.1 je izolovaný pravoúhlý dielektrický rezonátor (DR). Na rozdíl od sférického nebo válcového DR neexistuje přímá klasifikace pravoúhlých DR. Módy sférického DR jsou TE a TM, zatímco válcový má módy TE, TM a hybridní. Van Badel klasifikoval různě tvarované DR na dva typy *confined* (omezený) a *nonconfined* (neomezený).[8] Pro oba typy platí podmínka:

$$E \cdot n = 0 \quad (4.a)$$

kde E označuje intenzitu elektrického pole a n označuje normálu k povrchu rezonátoru. Rovnice je jedna z rovnic splňující podmínku magnetické stěny. Ostatní magnetické stěny mají podmínku:

Obr. 4.1. Izolovaný pravoúhlý DR



$$H \cdot n = 0 \quad (4.b)$$

tato podmínka nemusí být nutně splněna ve všech plochách DR. DR, které splňují obě podmínky jsou typu *confined* (do této skupiny patří také válcové DR pracující v módu TM_{010}). DR, které splňují pouze (4.a) jsou známy jako *nonconfined*. Pravoúhlé DR splňují pouze jednu podmínku magnetické zdi, a to (4.a). Pravoúhlé DR lze rozdělit do dvou typů, $TM(E)$ a $TE(H)$. Nicméně nejnižší módy $TM(E)$ nebyli nikdy experimentálně zkoumány. Pokud je použit jako model dielektrický vlnovod, a zjistí se, že nesplňuje podmínku (4.a), je existence módu $TM(E)$ pochybná. Na druhé straně jsou dobře známy nižší módy $TE(H)$. Nižší módy $TE(H)$ splňují podmínku pro typ *nonconfined* a proto zde budou využity k řešení rozložení pole.[8]

Pravoúhlý DR má tři nezávislé rozměry. Pokud jsou rozměry DR takové, že $a > h > d$, pak jsou při rezonanční frekvenci vybudzeny módy TE_{111}^x , TE_{111}^y a TE_{111}^z . Analýza dalších módů je podobná. Například pro mód TE_{111}^z může být uvnitř rezonátoru odvozen magnetický potenciál Φ^h . To vede k těmto rovnicím pole:

$$H_z = \frac{(k_x^2 + k_y^2)}{j\omega\mu_0} A \cos(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) \quad (4.c)$$

$$H_x = \frac{(k_x k_z)}{j\omega\mu_0} A \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) \quad (4.d)$$

$$H_y = \frac{(k_y k_z)}{j\omega\mu_0} A \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) \quad (4.e)$$

$$E_x = A k_y \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) \quad (4.f)$$

$$E_y = -Ak_x \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) \quad (4.g)$$

$$E_z = 0 \quad (4.h)$$

kde A představuje libovolnou konstantu, a k_x , k_y , a k_z , značí vlnová čísla v průběhu směrů x , y a z . DR. Při dodržení podmínky magnetické zdi na povrchu rezonátoru $E \cdot n = 0$ lze získat následující rovnice pro vlnová čísla k_x a k_y :

$$k_x = \frac{\pi}{a} \quad k_y = \frac{\pi}{b} \quad (4.i)$$

Dále je pomocí modelu dielektrického vlnovodu získána transcendentní rovnice pro vlnovodné číslo k_z :

$$k_z \tan\left(\frac{k_z d}{2}\right) = \sqrt{(\varepsilon_r - 1)k_0^2 - k_x^2} \quad (4.j)$$

vlnová čísla k_x , k_y , a k_z , také splňují rovnici:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \varepsilon_r k_0^2 \quad (4.k)$$

kde k_0 označuje vlnové číslo rezonanční frekvence ve volném prostoru.

5 Napájení dielektrické rezonátorové antény

V této kapitole jsou probrány možnosti napájení dielektrické rezonátorové antény (DRA). Při napájení mikropáskovým vedením je probráno ovlivňování vazby změnou permitivity dielektrického rezonátoru (DR). U napájení sondou je diskutován vliv jejího umístění, a změna délky středního vodiče sondy. Také zde bude popsána možnost napájení štěrbinou v zemní rovině a možnost jejího přizpůsobení při mikropáskovém přívodu. V poslední podkapitole bude diskutována možnost napájení koplanárním vedením.

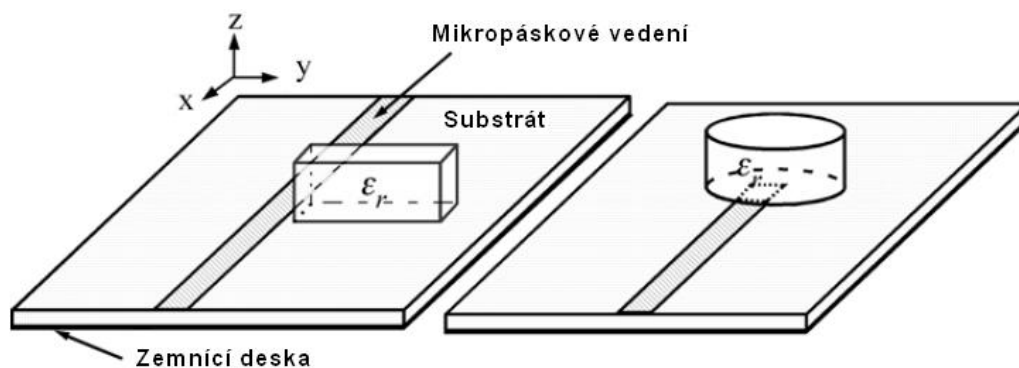
5.1 Napájení mikropáskovým vedením

Chceme-li budit anténu na vysokých kmitočtech, kde dosahují vlny délek řádově milimetrů, je vhodnější použít napájení mikropáskovým vedením než koaxiální sondou. Nevýhodou tohoto napájení je, že může ovlivňovat vyzařovací charakteristiku. Na obrázku 6.1a) je vidět napájení mikropáskovým vedením. Buzení mikropáskovým vedením vyvolá v pravoúhlém DR mód $TE_{\delta 11}^x$ a ve válcovém DR mód $HE_{11\delta}$. [9]

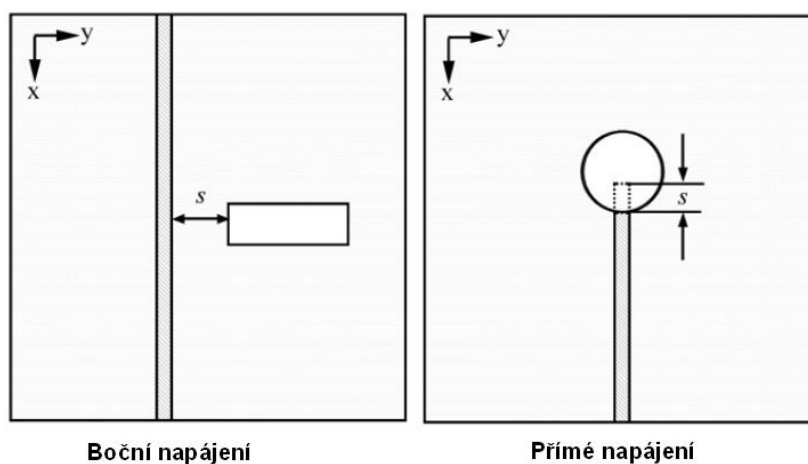
U pravoúhlých DRA je vazba spojení převážně ovlivňována relativní permitivitou DR a částečně je ovlivňována vzdáleností mikropáskového vedení od stěny DR. Pro silnější vazbu spojení je potřeba aby ε_r DR bylo větší jak 20. Použití materiálů s vyššími hodnotami permitivity má ale za následek zúžení šířky pásma. Při použití materiálu s nižší hodnotou permitivity je pak dosaženo menší vazby a to vede ke snížení účinnosti záření DRA. Napájení mikropáskovým vodičem může být použito pro napájení sériové řady lineárních DRA, za předpokladu, že je použito dostatečného počtu prvků. [10]

Při napájení válcového DR je mikropásek podsunut o vzdálenost s pod dielektrický rezonátor. Tato vazba je nejsilnější v místech, kde s je menší jak jedna čtvrtina vlnové délky

při rezonanční frekvence DR. Změnou délky podsunutí mikropáskového vedení lze také vyvolat vložený útlum.



Obr. 5.1a) Napájení mikropáskovým vedením, (převzato z [9]).

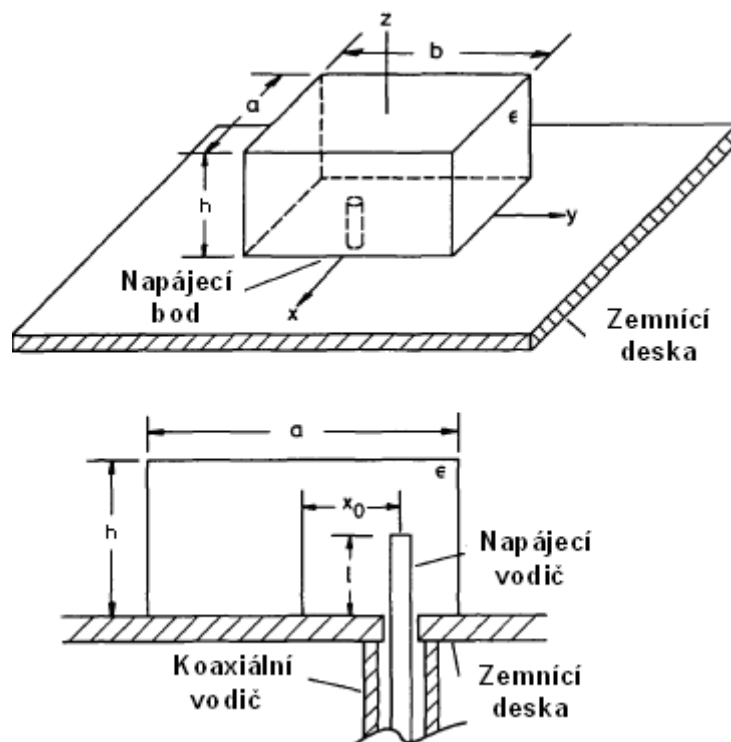


Obr. 5.1b) Provedení napájení mikropáskovým vedením, (převzato z [9]).

5.2. Napájení koaxiální sondou

Koaxiální sonda může být buď invazivně zavedená do DR, nebo k němu může být přitisknutá. Sondy jsou užitečné na nižších frekvencích, kde otvor nemusí být tolik přesný vzhledem k požadované velikosti. Spojení lze optimalizovat přesahem l centrálního vodiče sondy nad zemnicí desku, nebo také umístěním sondy. Jednou z výhod koaxiální sondy je přímá vazba s 50Ω sítí.

Délka sondy je volena nižší, než je výška DRA, aby neovlivňovala záření DRA. Z hlediska praktičnosti se sonda umísťuje vedle DRA, neboť se pak nevyžaduje vrtání do DR. Tomu se však nelze vyhnout u válcového DR, má-li pracovat v módu $TM_{01\delta}$. [9] Vědcům se nepodařilo nalézt jednoduché vzorce, které by daly do souvislosti výšku a pozici sondy se vstupní impedancí DRA, či její rezonanční frekvencí.



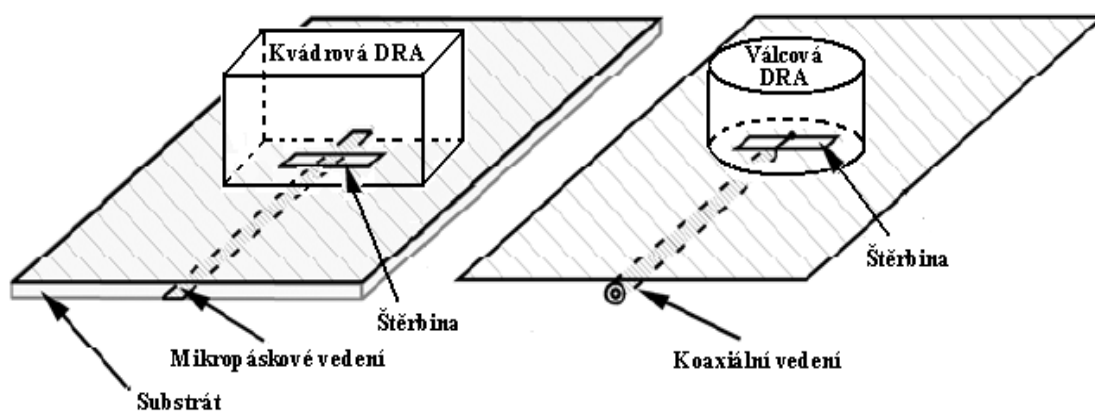
Obr.5.2 Napájení invazivní sondou, (převzato z [2]).

5.3 Napájení štěrbinou

Metoda pro buzení DRA spočívá v otvoru v zemní desce, na které je umístěna DRA. Štěrbina může mít tvar obdélníkový, prstencový, křížový nebo tvaru C. Štěrbina tvaru C, nebo tvaru kříže se využívá u válcové DRA k vybuzení kruhově polarizované vlny.[10]

Struktura provedení napájení štěrbinou je nakreslena na obrázku 6.3. Mikropáskové vedení, či koaxiální vedení je elektromagneticky provázáno s DRA skrze štěrbinu v zemní desce. Tento způsob napájení má tu výhodu, že neovlivňuje vyzařovací charakteristiku DRA.

Nejčastější způsob napájení přes štěrbinu je použitím mikropáskového vedení, neboť jej lze snadno vyrobit metodou tištěných spojů. Mikropáskové napájecí vedení může být prodlouženo za štěrbinu o pahýl, kterým lze vykompenzovat jalovou složku impedance štěrbiny. Plocha štěrbiny by měla být malá jak jen to je možné, aby se předešlo záření pod zemní desku. Je-li štěrbina příliš velká, pak je výrazně zatížena DRA a to vede k nežádoucímu posunu rezonanční frekvence a snížení jakosti DRA.

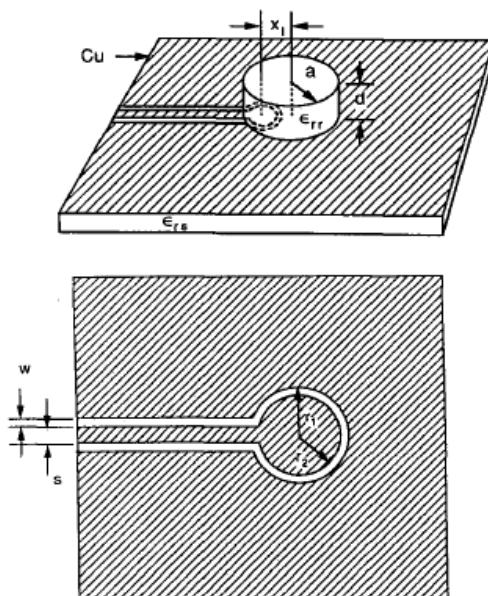


Obr. 5.3 Napájení DRA obdélníkovou štěrbinou.

5.4 Napájení koplanárním vedením

Na obrázku 5.4 je nakresleno provedení válcové DRA napájené koplanárním vedením s kruhovou smyčkou. U pravoúhlých DRA je smyčka koplanárního vedení zaměněna za pásek, pak má koplanární vedení tvar písmene Π .

Velikost spojení napájení ovlivňuje jak relativní permitivita DRA, tak i vzájemná poloha středu smyčky koplanárního vedení vůči středu válcové DRA. Změnou polohy smyčky z okraje DR do středu lze vyvolat v DRA mód $HE_{11\delta}$, nebo TE_{011} .



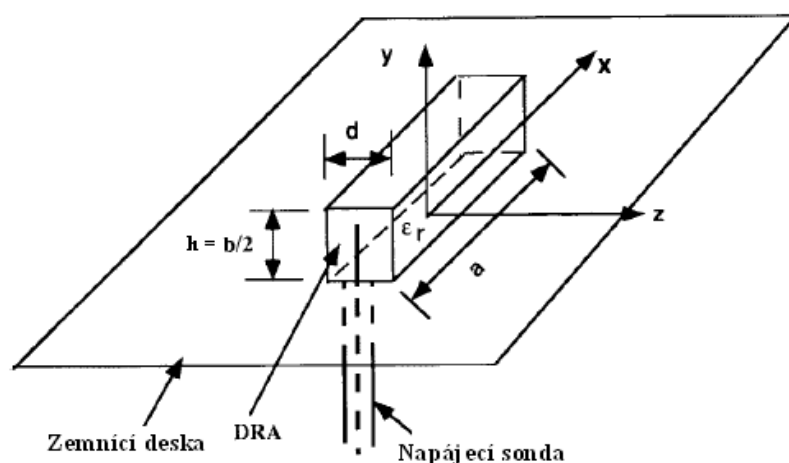
Obr.5.4 Struktura napájení DRA koplanárním vlnovodem, (převzato z[5]).

6 Parametry antén

Pro srovnávání různých antén mezi sebou je nutné stanovit jejich charakteristické vlastnosti.

- **Vstupní impedance** – získáme ji poměrem fázoru vstupního napětí ku fázoru vstupního proudu. Je-li vstupní impedance shodná s charakteristickou impedancí napáječe, je anténa impedančně přizpůsobena.
- **Rezonanční frekvence** – je-li anténa naladěna na rezonanční frekvenci, má její vstupní impedance pouze reálnou složku. Vhodnými rozměry a umístěním napájení dosáhneme impedance 50Ω , anténa je pak impedančně přizpůsobena.
- **Šířka pásma** – Je dána rozdílem horní mezní frekvence a dolní mezní frekvence. Tam kde parametr antény překročil svou předepsanou toleranci se nachází mezní frekvence, přičemž v rozsahu dolní mezní frekvence a horní mezní frekvence se parametr antény musí pohybovat v tolerančním pásmu. U antén bývá tímto parametrem činitel odrazu na vstupu antény - 10dB, a definuje tak impedanční šířku pásma.
- **Směrová charakteristika** – Popisuje záření antény v prostoru. Pro praxi nám stačí z této třírozměrné funkce znát její řezy v hlavních rovinách E a H.
- **Zisk antény** – Je roven poměru výkonů, který bychom naměřili na svorkách dané antény a izotropního zářiče pro požadovaný směr příjmu.
- **Polarizace** – Elektrická a magnetická složka elektromagnetické vlny jsou vzájemně kolmé, a zároveň jsou kolmé na směr šíření vlny. Pro konstrukci antén je důležitá rovina kmitání elektrické složky vzhledem k povrchu země. Rozlišujeme tedy horizontální a vertikální polarizaci.

7 Návrh kvádřové dielektricky rezonátorové antény



Obr.7 Kvádřová DRA s napájením invazivní sondou, (převzato [7]).

V této kapitole je probrán návrh dielektrické rezonátorové antény (DRA). K dispozici je substrát Arlon 1000, jehož tloušťka je 3,175mm a jeho relativní permitivita je $\epsilon_r = 10$. Anténa je navrhována na rezonanční kmitočet $f = 2,5\text{GHz}$. Ze zvolené rezonanční frekvence vypočítáme vlnové číslo ve volném prostoru podle vzorce (7.a):

$$k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad (7a)$$

Zvolíme výšku h a délku a DRA. Jelikož je jedna stěna DR ohraničena zemní deskou, je $h=b/2$. Ze zvolených rozměrů se vypočítají vlnová čísla pro směry x a y dle (4.h). Vlnová čísla k_x , k_y , k_z musí splňovat podmínku (7.b), aby bylo vlnové číslo k_z reálné.

$$\epsilon_r k_0^2 > k_x^2 + k_y^2 \quad (7b)$$

Ze vztahu (4j) odvodíme vzorec (7c) pro vlnové číslo k_z ve směru z , a ze vztahu (4.i) odvodíme vzorec (7d) pro šířku d DRA:

$$k_z = \pm \sqrt{\epsilon_r k_0^2 - k_x^2 - k_y^2} \quad (7.c)$$

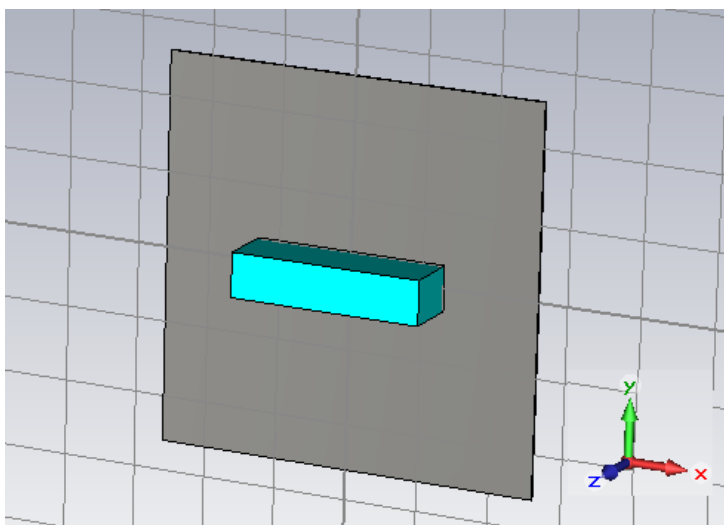
$$d = \frac{2 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(\epsilon_r - 1)k_0^2 - k_z^2}}{k_z} \right)}{k_z} \quad (7.d)$$

Jelikož pro výšku antény $h=3,175\text{ mm}$ by nebylo možné splnit podmínku (7.b), zvolil jsem výšku antény jako pětinašobek tloušťky substrátu, tedy $h=15,875\text{ mm}$. (V návrhu jsem zanedbal zvětšení o přidané lepidlo při slepování substrátů.) Délku DRA jsem zvolil $a=52\text{mm}$. Z výše uvedených vztahů jsem spočítal šířku DRA, která vyšla $d=12\text{mm}$. Zemní

desku jsem zvolil čtvercového tvaru s délkou hrany $e=104\text{mm}$. Tlustka zemní desky je $t=0,5\text{mm}$. Jako napájení jsem zvolil invazivně zavedenou sondu.

8 Simulace kvádřové dielektrické rezonátorové antény v programu CST Microwave Studio

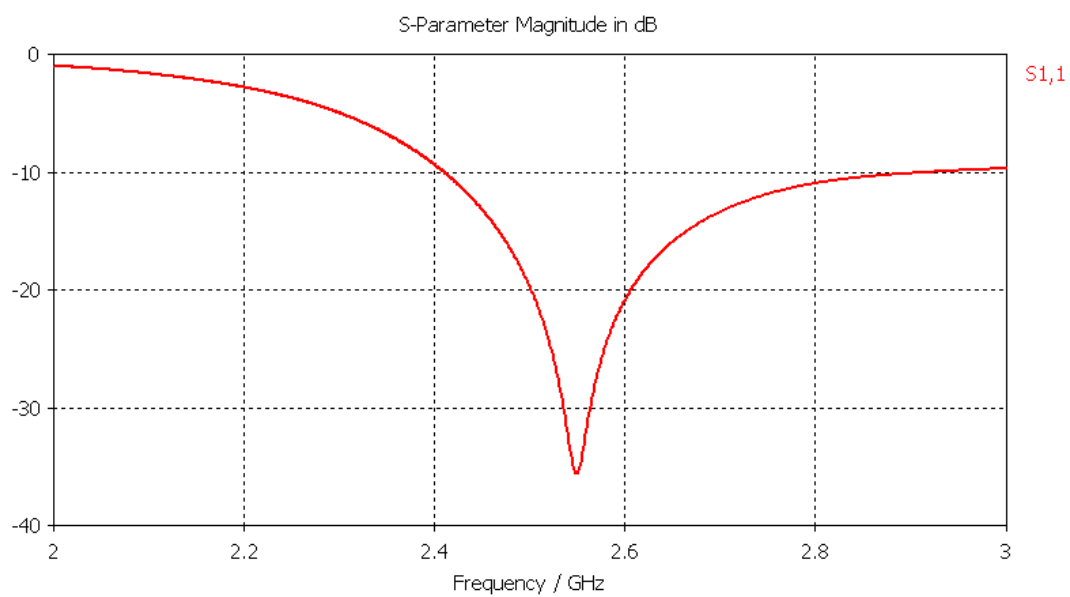
Pro simulaci antény jsem zvolil frekvenční rozsah od 2GHz do 3GHz. Okrajové podmínky jsou voleny *open (add space)*. Diskretizační síť je nastavena na 60 buněk na vlnovou délku. Střed souřadné soustavy je zvolen jako střed spodní stěny dielektrického rezonátoru (DR). Tento střed je také středem horní plochy zemnicí desky. Na obr. 8.1 je nakreslen model DRA.



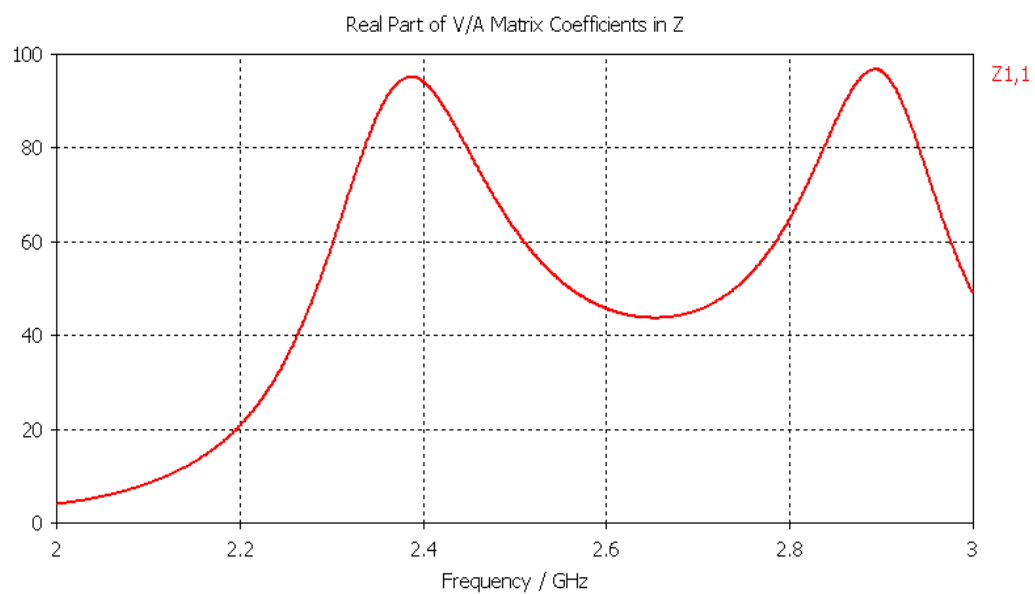
Obr.8.1 Model DRA

Pomocí parametrické analýzy byla nalezena nejvhodnější pozici napájecí sondy a její hloubku zanoření do DRA: vzdálenost sondy od středu DRA ve směru x je 19 mm a hloubka zanoření sondy je 12,5 mm.

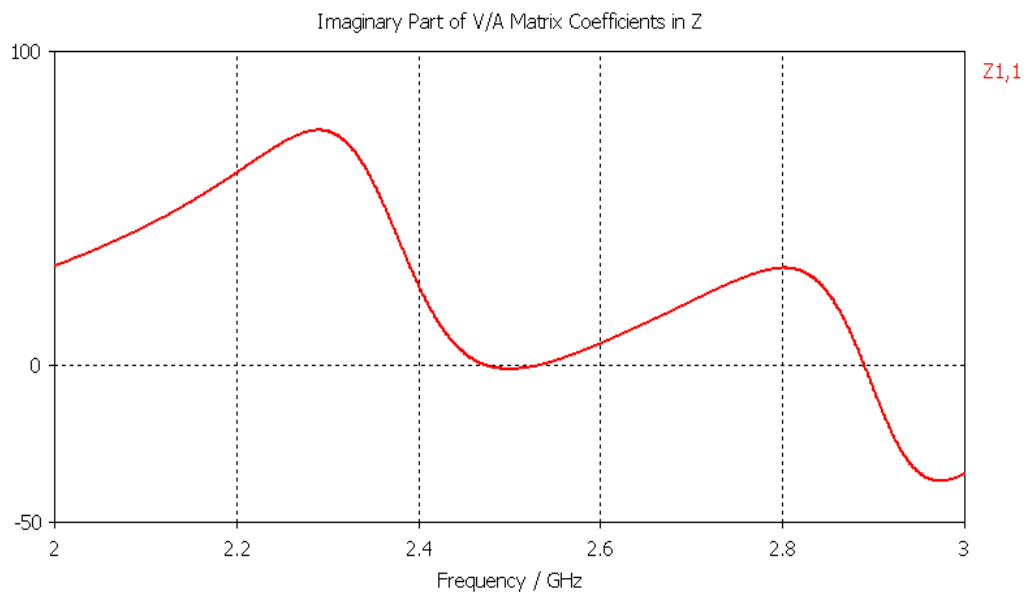
Na obr.8.2 je zobrazen graf činitele odrazu S_{11} , kde činitel odrazu má na rezonanční frekvenci $f=2,549\text{ GHz}$ hodnotu $S_{11}=-35,6\text{dB}$. Odečtená šířka pásma z tohoto grafu je 0,53 GHz. Na obr. 8.3 je znázorněn průběh reálné části vstupní impedance, a na obr. 8.4 je vykreslen průběh imaginární části vstupní impedance. Na obr. 8.5 je vykreslen vyzařovací diagram DRA, na frekvenci 2,55 GHz.



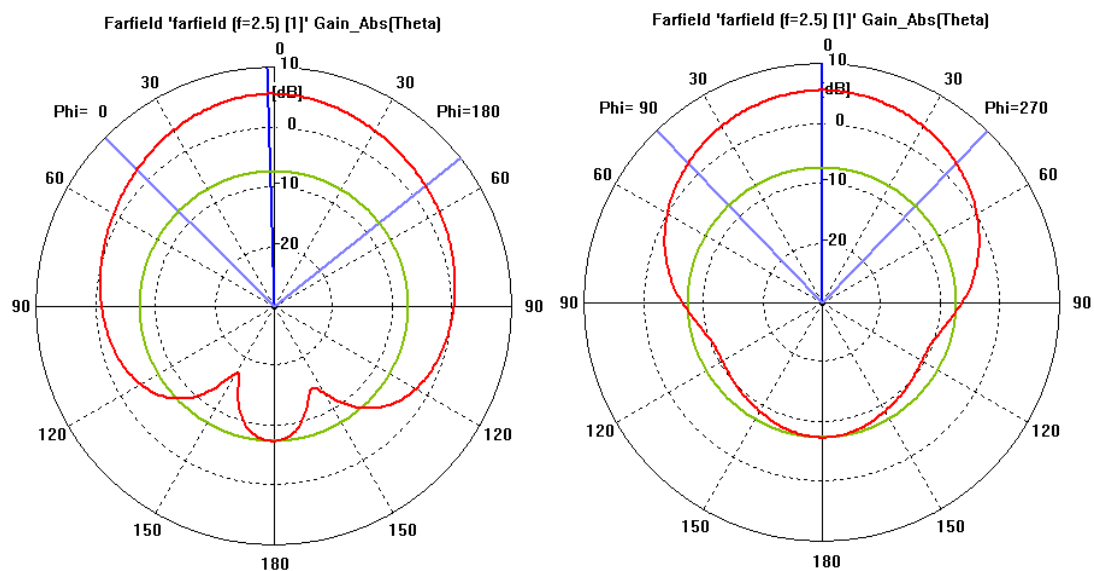
Obr.8.2 Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} DRA.



Obr.8.3 Závislost reálné části vstupní impedance DRA na frekvenci.



Obr. 8.4 Závislost imaginární části vstupní impedance na frekvenci.



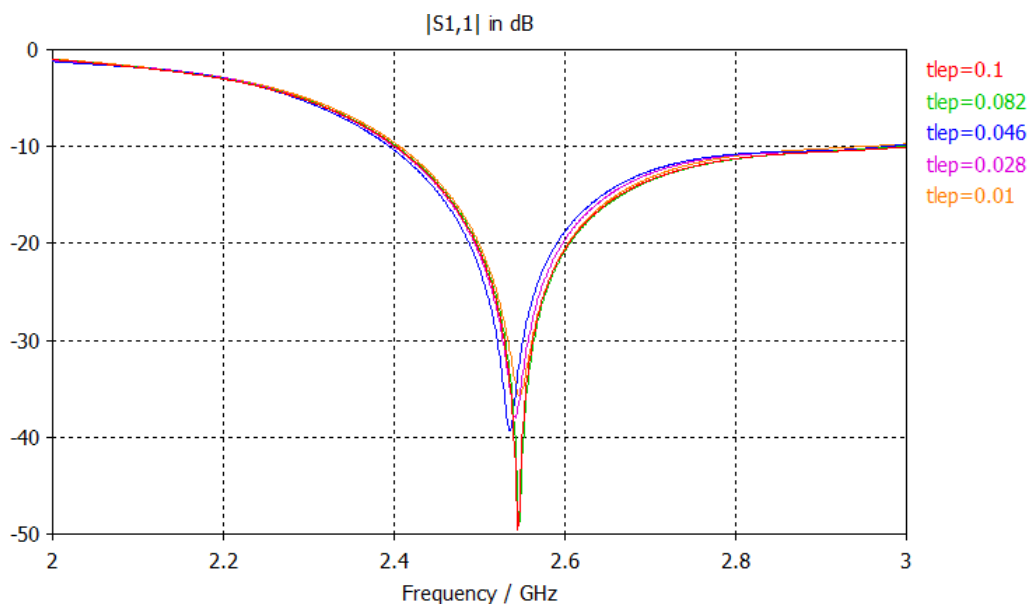
Obr.8.5 Vyzařovací diagramy DRA v rovině E a H při rezonanční frekvenci 2,5GHz.

9 Simulace vlivů lepidla na DRA

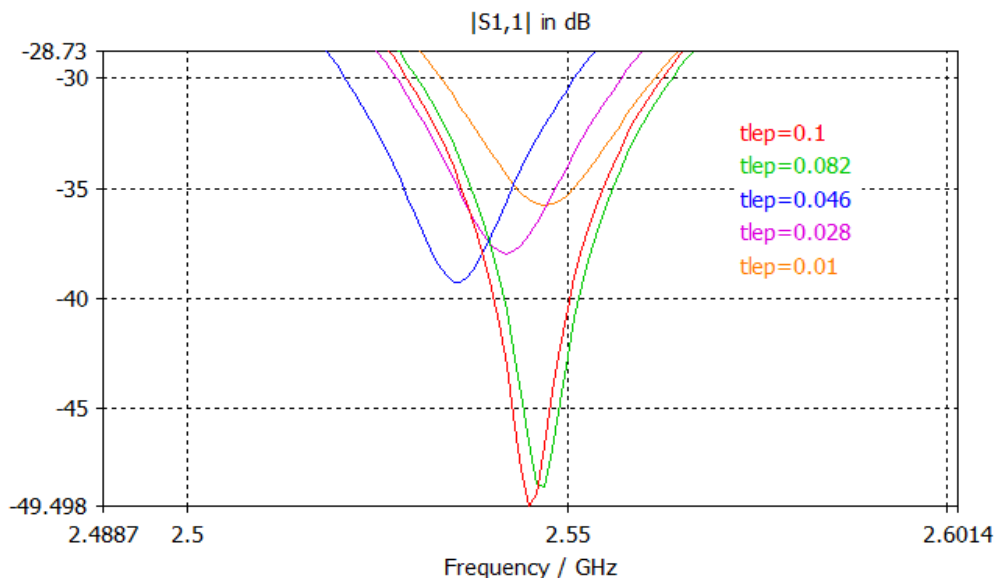
DRA bude vyrobena slepováním proužků dielektrického materiálu, je tedy potřeba před zahájením vlastní výroby antény prozkoumat chování vzniklé nehomogenní struktury DR. V této části práce se zkoumá, jak ovlivní tloušťka lepidla a jeho dielektrická permitivita rezonanční frekvenci a činitel odrazu DRA.

9.1 Vliv tloušťky lepidla

Tloušťka lepeného spoje je se pohybuje v rozmezí 30 až 50 μm , rozhodl jsem se postihnout v analýze větší rozmezí tloušťky lepidla, a to od 10 μm do 100 μm . Dielektrickou permitivitu lepidla jsem zvolil $\epsilon_r = 3$.



Obr.9.1a) S_{11} při různých tloušťkách lepidla.



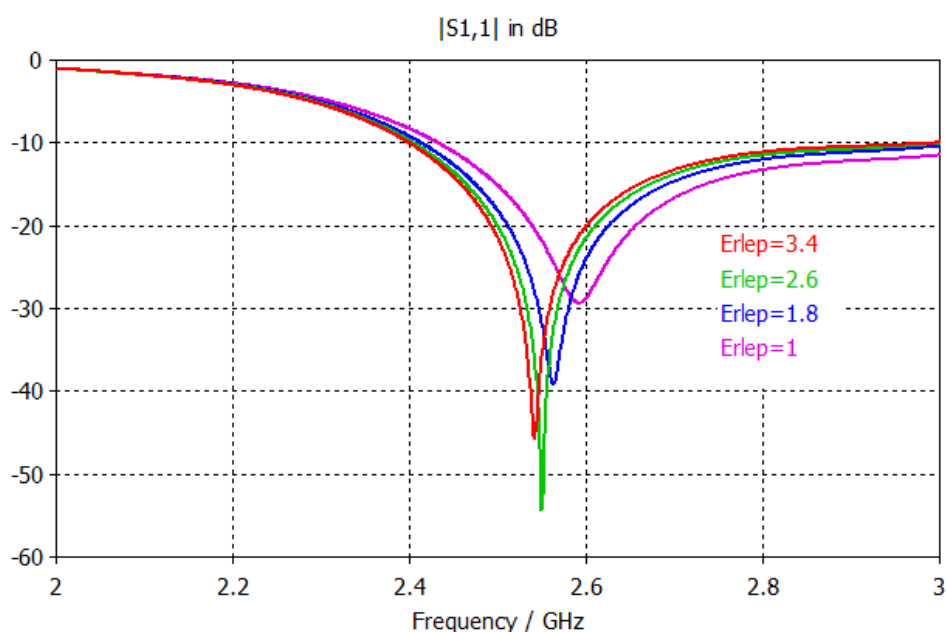
Obr.9.1b) Detail minima S_{11} při různých tloušťkách lepidla

Z obrázku 9.1b je vidět, že při tloušťce lepidla 0,1mm dosahuje činitel S_{11} hodnoty -49,5dB. Provedl jsem tedy simulaci základního modelu, kde jsem jeho výšku zvětšil o 0,4mm. Činitel odrazu zde dosáhl hodnoty -37dB, což je zlepšení jen o 1,4dB u základního modelu (Základní model – homogenní struktura).

Jelikož tloušťky lepidla tvoří tenké struktury, nastavil jsem pro tyto simulace jemnější lokální síť (*mesh edge refinement factor* a *volume refinement factor* na 10).

9.2 Vliv permitivity lepidla

Předpokládejme, že tloušťka lepidla nebude větší než 100 μm a pro tuto tloušťku bude měněna relativní permitivita lepidla. Výsledky jsou na zobrazeny na obr. 9.2. Z něj je patrné, že při permitivitě lepidla $\epsilon_r = 2,6$ dosahuje činitel odrazu nejnižší hodnoty.

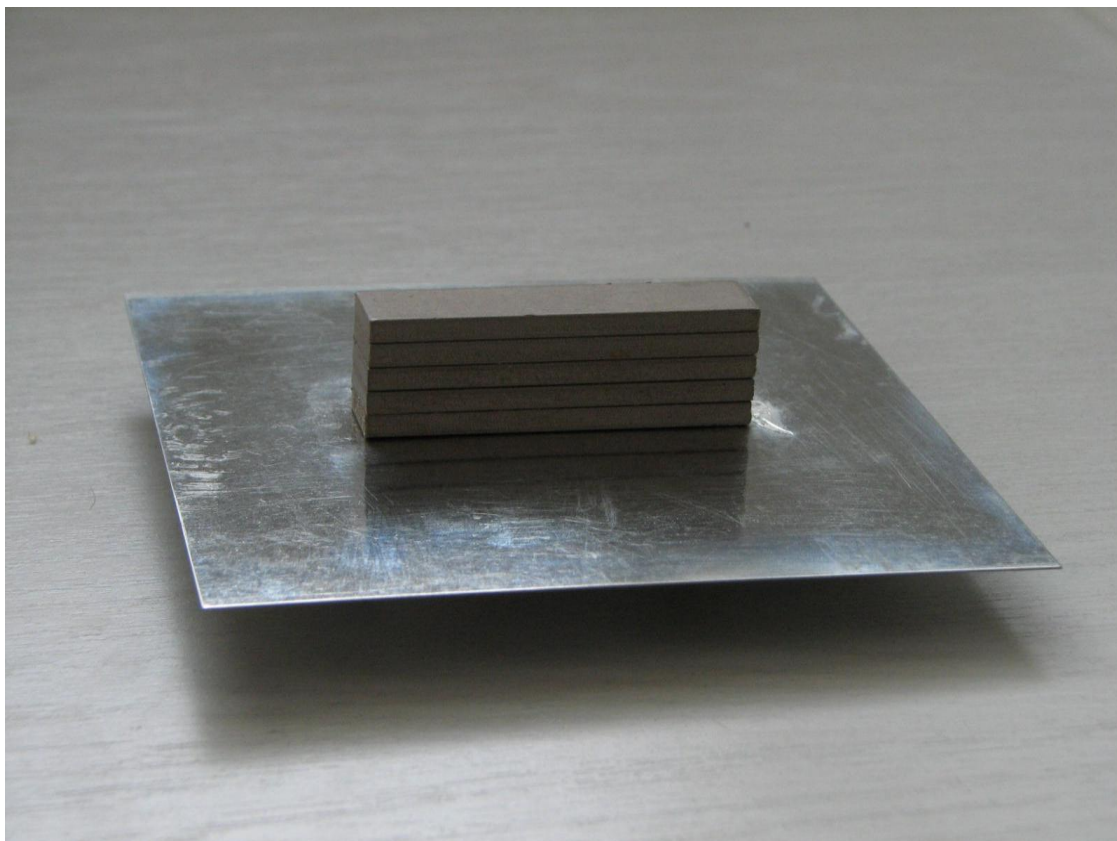


Obr.9.2 Vlivy lepidel s různou permitivitou na S_{11} .

10 Výroba a měření dielektrické rezonátorové antény

Při výrobě antény je třeba slepovat materiál v pravoúhlém přípravku, aby pláty seděli přesně na sobě. Střední vodič sondy je třeba nastavit napájením měděného drátku průměru 1,26mm na délku 13mm až 13,1mm (12,5mm hloubka invazivně zavedené sondy + 0,55mm tloušťka zemnicí desky).

Po odleptání mědi z Arlonu 1000 byla průměrná tloušťka destiček 3,265mm, přičemž výrobcem udávaná hodnota je 3,175mm. Toto může být způsobeno absorpcí leptacího roztoku materiálu při odleptávání měděného povrchu a také nejspíš na materiálu zůstala tenká vrstvička lepidla, kterým byla přilepena měděná fólie. Průměrná výška vzniklého DR je 16,452mm, z čehož vyplývá, že tloušťka jednoho lepeného spoje je přibližně 0,03175mm. Tyto změřené hodnoty byly použity pro další simulace pro srovnání reálné DRA.

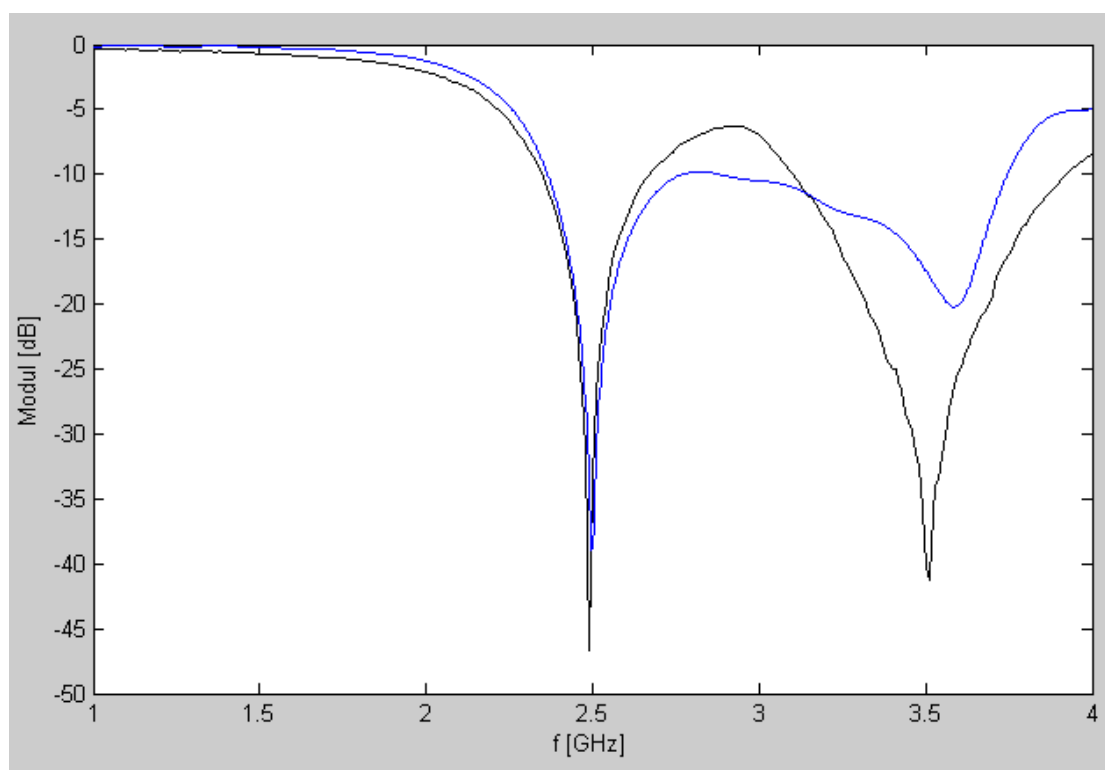


Obr. 10.1 Fotografie vyrobené antény.

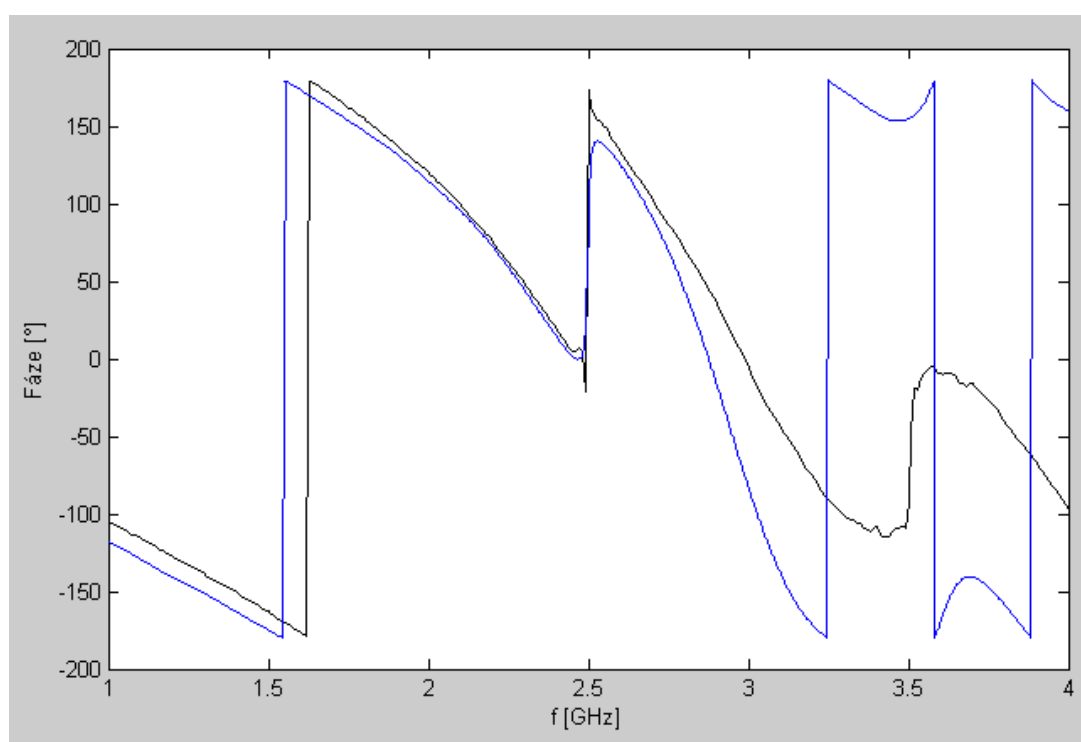
Orientační měření této antény bylo provedeno v učebně PA 727 na vektorovém analyzátoru firmy ROHDE&SWARZ. Před vlastním měřením byl přístroj kalibrován pomocí kalibračního přípravku připojeného kabelem s konstantní elektrickou délkou. Po kalibraci jsme připojili k přístroji pomocí kabelu s konstantní el. délkou DRA.

Na obrázku 10.2 je vidět jak se liší S_{11} simulované antény a reálné antény. Pásmo vyrobené antény je v rozmezí 2,35GHz až 2,675GHz, její šířka pásma je tedy 0,325GHz. Pásmo simulované antény se pohybuje v rozmezí frekvencí 2,36GHz až 2,752GHz, a šířka pásma je tedy 0,392GHz. Na obrázku je také vidět také další rezonance na frekvenci 3,5GHz. Tato rezonance je nejspíše způsobena nevhodnou volbou šířky rezonátoru. Na obrázku 10.3 je srovnání změny fáze simulované antény a reálné antény. Vyrobená anténa je v těchto obrázcích znázorněna černou křivkou a simulace je znázorněna modrou křivkou.

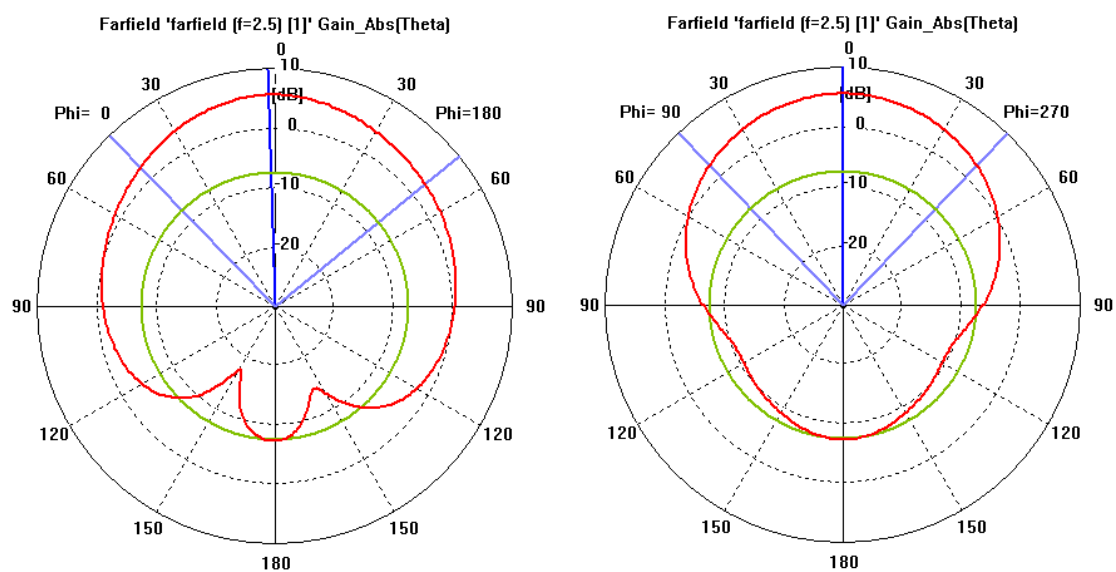
Na obrázcích 10.4 jsou vyzařovací charakteristiky v rovině E a H modelované reálné antény v CST Microwave studio. Tyto charakteristiky můžeme srovnat s charakteristikami reálně změřené antény, které jsou na obrázcích 10.4 a 10.5. Tyto charakteristiky jsou jenom orientační, největší hodnota signálu byla stanovena na úhel 0° .



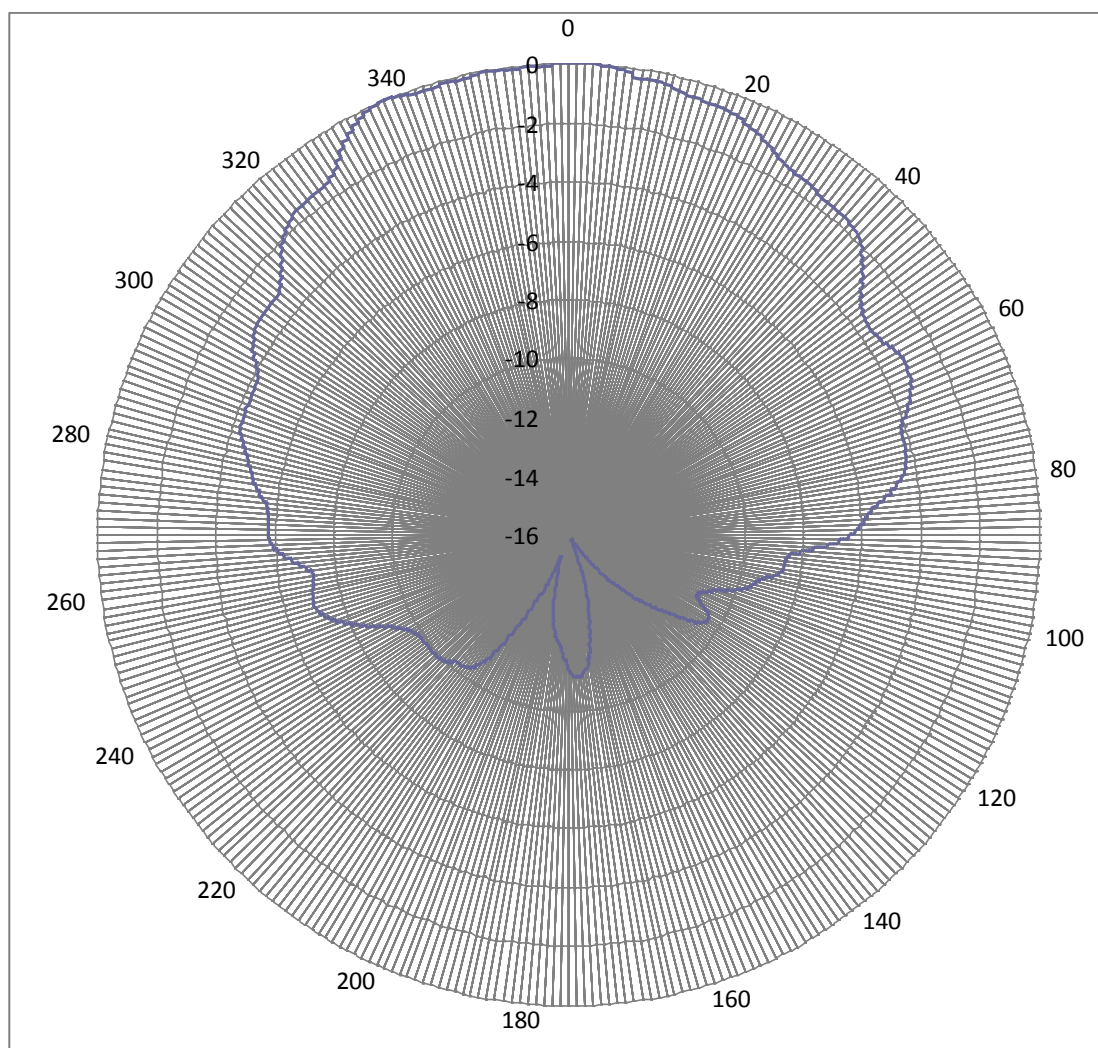
Obr.10.2 Porovnání S_{11} simulované a vyrobené antény (modře simulace, černě měření).



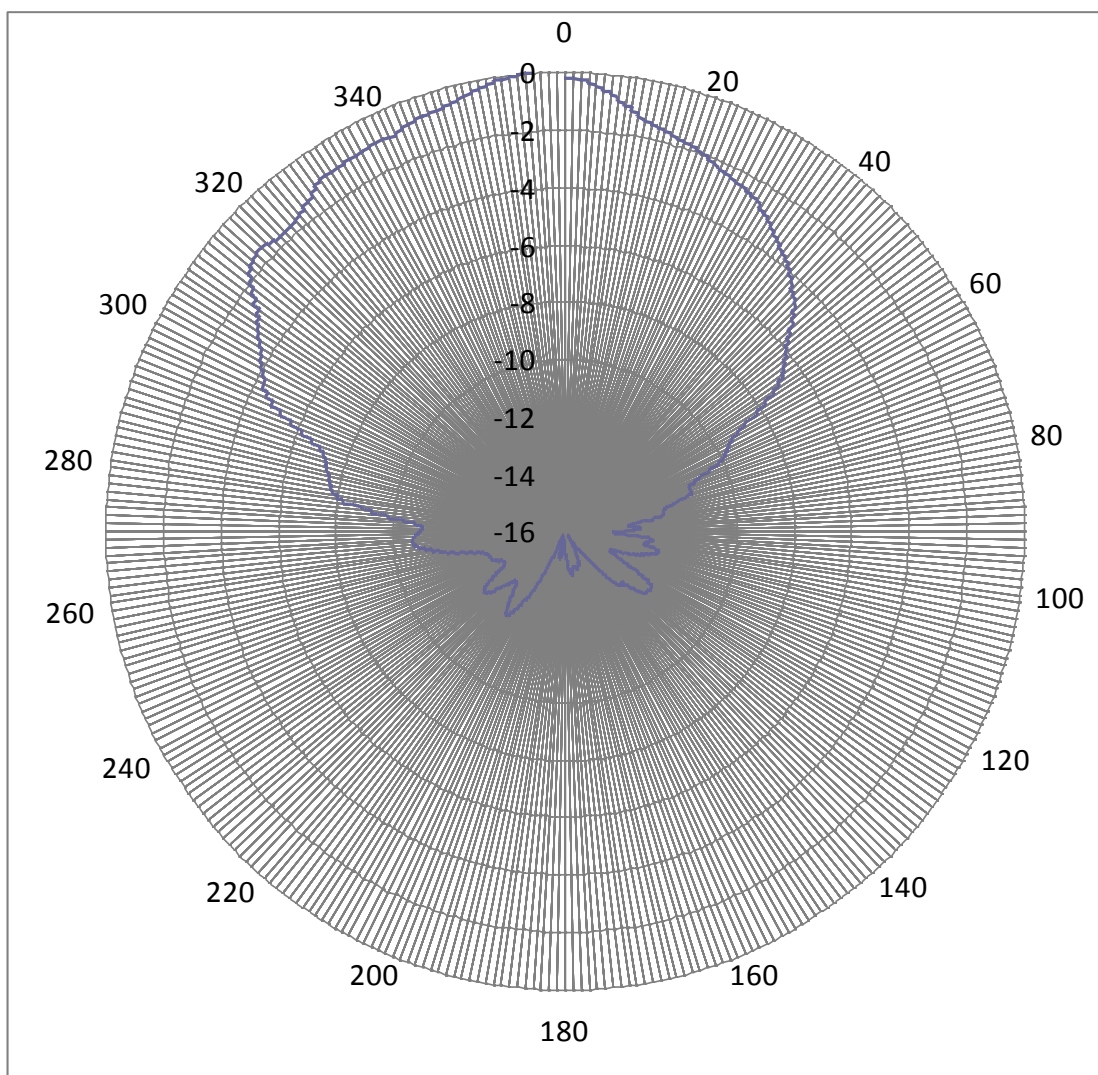
Obr. 10.3 Porovnání změny fáze simulované a vyrobené antény (modře simulace, černě měření).



Obr. 10.4 Vyzařovací charakteristiky v rovině E a H simulované s reálnými rozměry.



Obr. 10.5 Vyzařovací charakteristika vyrobené DRA v rovině E



Obr. 10.6 Vyzařovací charakteristika vyrobené DRA v rovině H.

10 Závěr

Cílem této práce bylo se seznámit s dielektrickými anténami a možnosti jejich napájení. Po prostudování odborné literatury jsem popsal její vlastnosti a možnosti jejího napájení. Dle zadání jsem navrhl kvádrovou DRA s rezonančním kmitočtem $f=2,5$ GHz a napájením invazivně zavedenou koaxiální sondou. Navrženou kvádrovou DRA jsem pak simuloval v komerčním programu CST Microwave Studio.

Pomocí parametrické analýzy se mi podařilo anténu vyladit na rezonanční kmitočet $f=2,549$ GHz. Na tomto rezonančním kmitočtu byl činitel odrazu $S_{11}=-35,6$ dB. Šířka pásma pro pokles činitele odrazu o -10dB je $B=0,53$ GHz ($f_h=2,94$ GHz, $f_d=2,41$ GHz).

Vzhledem k tomu, že navržená anténa je realizována slepením několika vrstev substrátu na sebe, je v další práci zkoumán vliv spojení těchto vrstev lepidlem. Vrstvy lepidla ovlivňují jak konečnou výšku dielektrického rezonátoru, tak i jeho strukturu.

Z provedených simulací vyplývá, že s rostoucí tloušťkou lepidla se zlepšuje i jeho činitel přizpůsobení, přičemž při tloušťce 0,1mm je tento výsledek nejlepší. Při zkoumání vlivu permitivity lepidla se ukázalo, že nejlepšího výsledku by bylo dosaženo při permitivitě 2,6.

Navržená anténa byla realizována a změřena na vektorovém analyzátoru. Rozměry vyrobené antény byly také simulovány, a výsledky simulací byly porovnány s výsledky měření. Drobné odchylky výsledků, které jsme naměřili, a které jsou získány z provedených simulací jsou nejspíše způsobeny okolními vlivy při měření. Dalším zdrojem chyb je z části také způsobena nepřesností výroby.

Literatura:

- [1] Long, S., McAllister M., and L., Shen, „The resonant dielectric cavity antenna,“ *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, March 1983, vol. 31, pp. 406–412.
- [2] Long, S. A., M. W. McAllister, and L. C. Shen, „Rectangular dielectric resonator antenna,“ *IEEE Electronics Letters*, March. 1983, Vol. 19, No. 6
- [3] R.A., Kranenburg, S.A., Long, „Microstrip transmission line excitation of dielectric resonátor antennas“ *Electronics Letters* 1 Sep 1988, Vol. 24, , pp. 1156–1157
- [4] A., Petosa, A., Ittipiboon, Y.M.M., Antar, D., Roscoe, M., Cuhaci, „Recent advances in dielectric-resonator antenna technology“ *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 1998, vol. 40, pp. 35–48,
- [5] R. A. Kranenburg, S. A. Long, and J. T. Williams, “Coplanar waveguide excitation of dielectric resonator antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Jan. 1991, vol. 39, pp. 119–122,.
- [6] M. Čambal, „Dvoupásmová dielektrická rezonátorová anténa“ *Diplomová práce* 2007, ČVUT Praha, 54s
- [7] A. Petosa, A. Ittipiboon, Y. M. M. Antar, D. Roscoe, and M. Cuhaci, “Recent advances in dielectric-resonator antenna technology,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 1998, vol. 40, pp. 35–48.
- [8] R. K. Mongia and A. Ittipiboon, “Theoretical and experimental investigations on rectangular dielectric resonator antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Sep. 1997, vol. 45, no. 9, pp. 1348–1356.
- [9] A., Petosa, “Dielectric Resonator Antennas Handbook” *ISBN 978-1-59693-207-4*, 2007, p 336
- [10] K. M. Luk, K. W., Leung, „Dielectric Resonator Antennas” *Research Studies Press Ltd. Research Studies Press Ltd.* “ 2003, p388

Seznam symbolů, veličin a zkratk

DR	Dielektrický resonátor
DRA	Dielektrická rezonátorová antenna
TE	transverzálně elektrická vlna
TM	transverzálně magnetická vlna
a	délka rezonátoru
b	výška rezonátoru
c	rychlost světla
d	šířka rezonátoru
e	délka hrany zemnicí desky
h	výška rezonátoru
t	tloušťka zemnicí desky
E	intenzita elektrického pole
ϵ_r	relativní permitivita
E_x	složka intenzity elektrického pole ve směru osy x
E_y	složka intenzity elektrického pole ve směru osy y
E_z	složka intenzity elektrického pole ve směru osy z
E	intenzita magnetického pole
f	rezonanční frekvence
H_x	složka intensity magnetického pole ve směru osy x
H_y	složka intensity magnetického pole ve směru osy y
H_z	složka intensity magnetického pole ve směru osy z
k_0	vlnové číslo ve volném prostoru
k_x	vlnové číslo rezonátoru ve směru x
k_y	vlnové číslo rezonátoru ve směru y
k_z	vlnové číslo rezonátoru ve směru z